



**О.Г. Кумпяк**  
**З.Р. Галяутдинов**  
**О.Р. Пахмурин**  
**В.С. Самсонов**

# **Железобетонные и каменные конструкции**



**О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов  
О.Р. Пахмурин, В.С. Самсонов**

# **Железобетонные и каменные конструкции**

*Под ред. д.т.н., проф. О.Г. Кумпяка*

*Рекомендовано Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по программе бакалавриата по направлению 270800 «Строительство» (профили «Промышленное и гражданское строительство, «Городское строительство и хозяйство», «Экспертиза и управление недвижимостью»)*



**Издательство АСВ  
Москва 2014**

УДК 624.012(075)  
Ж-513

***Рецензенты:***

*Н.Г. Головин* – зав. кафедрой железобетонных конструкций  
Московского государственного строительного университета, профессор

*В.С. Плевков* – член-корр. МАН ВШ, д.т.н., профессор Томского  
государственного архитектурно-строительного университета

*Трекин Н.Н.* – д.т.н., профессор, начальник отдела  
конструктивных систем ОАО «ЦНИИПромзданий»

**О.Г. Кумпяк и др.** Железобетонные и каменные конструкции.  
Учебник. Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Издательство АСВ. – 2014. –  
672 с.

ISBN 978-5-4323-0039-3

Учебник представляет собой курс лекций по железобетонным и каменным конструкциям и включает материал по физико-механическим свойствам бетона, арматуры и железобетона, а также метод расчёта железобетонных конструкций по предельным состояниям, и применение данного метода к расчёту конструкций при различных схемах деформирования (изгибе, сжатии, внецентренном сжатии и растяжении).

В работе также представлен материал по многоэтажным и одноэтажным промышленным зданиям, каменным конструкциям, пространственным покрытиям и специальным сооружениям. После каждой лекции по теоретическим вопросам расчета железобетонных конструкций и каменной кладки приведены вопросы для самоконтроля и примеры расчёта.

Материал учебника по содержанию и объёму соответствует требованиям государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования при подготовке бакалавров по направлению 270800 «Строительство»: профили подготовки «Промышленное и гражданское строительство», «Городское строительство и хозяйство», «Экспертиза и управление недвижимостью».

*Регистрационный номер рецензии 2769 от 01.04.2014 г.*

ISBN 978-5-4323-0039-3

© Издательский дом АСВ, 2014

© ТомГАСУ, 2014

© Коллектив авторов, 2014

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс лекций по железобетонным и каменным конструкциям написан на основе типовой программы «Железобетонные и каменные конструкции» для высших учебных заведений по направлению 270800 «Строительство»: профили подготовки «Промышленное и гражданское строительство», «Городское строительство и хозяйство», «Экспертиза и управление недвижимостью».

При этом в основу положены требования действующего нормативного документа СП 63.13330. 2012 «Бетонные и железобетонные конструкции». Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.

Методической особенностью данного учебного издания является изложение расчета железобетонных и каменных конструкций в тесной взаимосвязи с их практическим использованием. Теоретический материал сопровождается вопросами для самоконтроля и конкретными несложными примерами расчета железобетонных конструкций, а также элементов каменной и армокаменной кладки, что позволяет обучающемуся глубже понять суть теоретического материала и его использования в практических расчетах

При написании курса лекций учтен многолетний опыт преподавания дисциплины на кафедре «Железобетонные и каменные конструкции» в Томском государственном архитектурно – строительном университете на дневном и заочном факультетах.

Учебник «Железобетонные и каменные конструкции» предназначен для студентов очной и заочной форм обучения, получающих образование по направлению 270800 «Строительство».

*Авторы*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Лекция 1.</b> Сущность железобетона .....	6
<b>Лекция 2.</b> Классификация бетонов. Структура. Прочность при различных видах загрузки .....	16
<b>Лекция 3.</b> Деформативные свойства бетона .....	29
<b>Лекция 4.</b> Арматура для железобетонных конструкций .....	43
<b>Лекция 5.</b> Железобетон .....	59
<b>Лекция 6.</b> Экспериментальные основы теории железобетона .....	71
<b>Лекция 7.</b> Расчёт железобетонных конструкций по предельным состояниям.....	80
<b>Лекция 8.</b> Особенности расчёта предварительно напряженных железобетонных конструкций .....	91
<b>Лекция 9.</b> Расчет прочности изгибаемых элементов по нормальным сечениям.....	106
<b>Лекция 10.</b> Расчёт элементов прямоугольного профиля с двойной арматурой. Расчёт элементов таврового профиля.....	123
<b>Лекция 11.</b> Расчёт прочности изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям .....	136
<b>Лекция 12.</b> Сжатые железобетонные элементы.....	155
<b>Лекция 13.</b> Растянутые элементы .....	173
<b>Лекция 14.</b> Расчёт железобетонных элементов по образованию и раскрытию трещин .....	182
<b>Лекция 15.</b> Расчёт железобетонных конструкций по деформациям .....	203
<b>Лекция 16.</b> Многоэтажные здания .....	219
<b>Лекция 17.</b> Балочные панельные сборные перекрытия .....	233
<b>Лекция 18.</b> Проектирование сборного неразрезного ригеля .....	248
<b>Лекция 19.</b> Монолитные ребристые перекрытия.....	261
<b>Лекция 20.</b> Расчет и конструирование безбалочных перекрытий.....	283
<b>Лекция 21.</b> Расчет и конструирование крупнопанельных зданий.....	301
<b>Лекция 22.</b> Железобетонные фундаменты .....	316
<b>Лекция 23.</b> Каменные конструкции .....	328

<b>Лекция 24.</b> Расчет каменной кладки по методу предельных состояний ...	344
<b>Лекция 25.</b> Армокаменные конструкции.....	361
<b>Лекция 26.</b> Проектирование каменных конструкций зданий .....	377
<b>Лекция 27.</b> Одноэтажные производственные здания .....	403
<b>Лекция 28.</b> Расчет поперечной рамы одноэтажного производственного здания .....	414
<b>Лекция 29.</b> Железобетонные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий .....	429
<b>Лекция 30.</b> Стропильные конструкции. Фермы. Арки.....	449
<b>Лекция 31.</b> Колонны. Подкрановые балки .....	461
<b>Лекция 32.</b> Общие сведения о пространственных покрытиях и их основные виды .....	470
<b>Лекция 33.</b> Цилиндрические оболочки и складки .....	482
<b>Лекция 34.</b> Расчет и конструирование оболочек вращения.....	496
<b>Лекция 35.</b> Пологие оболочки двойкой кривизны. Волнистые своды.....	508
<b>Лекция 36.</b> Расчет и конструирование висячих покрытий .....	532
<b>Лекция 37.</b> Оболочки в виде гиперболических параболоидов.....	545
<b>Лекция 38.</b> Типы инженерных сооружений. Железобетонные бункеры .....	560
<b>Лекция 39.</b> Железобетонные силосы .....	582
<b>Лекция 40.</b> Железобетонные подпорные стены.....	602
<b>Лекция 41.</b> Железобетонные резервуары .....	617
<b>Лекция 42.</b> Особенности проектирования зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах.....	643
<b>Список литературы</b> .....	660
<b>Приложения</b> .....	662

# Лекция 1

## СУЩНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

1. *Сущность железобетона*
2. *Предварительно напряженный железобетон*
3. *Краткий исторический очерк развития железобетона*
4. *Области применения железобетона и перспективы его развития*

### 1. Сущность железобетона

Железобетоном называется строительный материал, состоящий из бетона и стали: железом раньше называли сталь. Бетон, как и все каменные материалы, имеет прочность при растяжении в 10...20 раз меньшую, чем при сжатии, поэтому в конструкциях, воспринимающих растягивающие напряжения, он не может эффективно использоваться.

Проведем мысленный эксперимент. Изготовим из бетона одного состава две одинаковые балки: одну бетонную, а в другой установим стальные стержни. После набора прочности бетоном проведем испытания балок, загружая их постепенно возрастающей силой  $F$  (рис. 1.1). С появлением в нижней зоне трещины бетонная балка разрушится при небольшой нагрузке  $F_{u1}$ . В балке со стальными стержнями (арматурой) первая трещина появится при нагрузке  $F_{crс}$ , примерно равной разрушающей нагрузке бетонной балки ( $F_{u1}$ ). Разрушение балки произойдет при нагрузке  $F_{u2} \gg F_{u1}$ , т.к. растягивающие напряжения в ней после образования трещин воспринимаются арматурой.

Эффективность железобетона объясняется следующими его свойствами:

- бетон имеет высокую прочность при сжатии (до 100 МПа), а сталь при растяжении и сжатии (от 240 до 1700 МПа);
- арматура надежно сцепляется с бетоном, не проскальзывая в нем до момента разрушения;
- сталь и бетон имеют почти одинаковые коэффициенты линейного температурного расширения, поэтому при нагреве и охлаждении не возникает опасных напряжений, разрушающих конструкцию;

- бетон надежно защищает арматуру от коррозии и высоких температур (при пожарах), обеспечивая необходимую долговечность и огнестойкость.

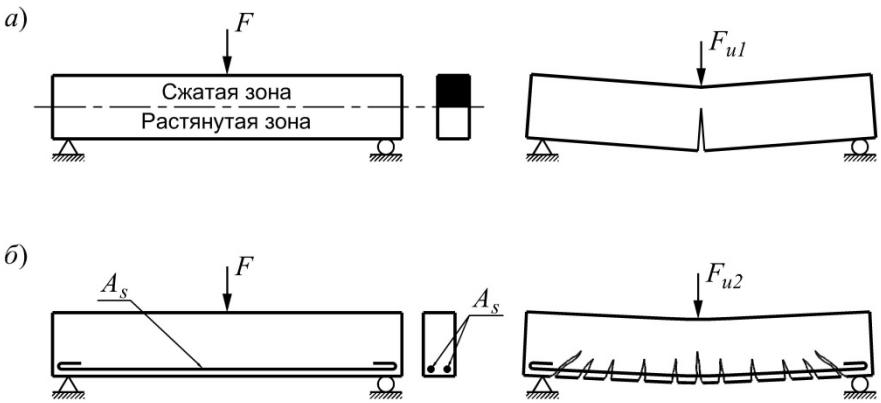


Рис. 1.1. Разрушение бетонной (а) и железобетонной (б) балок

## 2. Предварительно напряженный железобетон

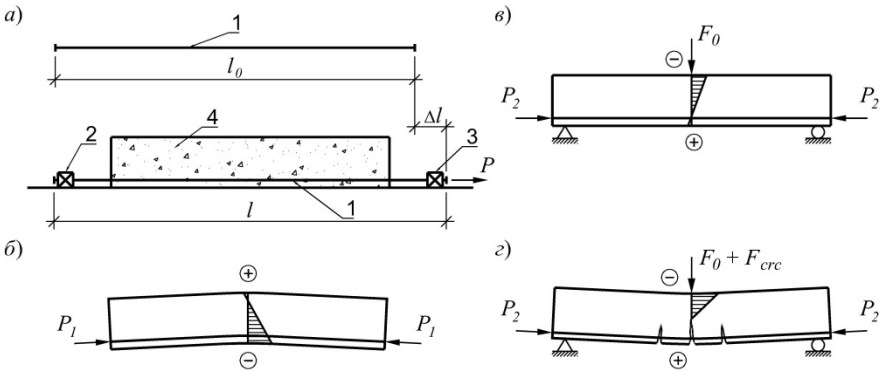
В растянутой зоне железобетонной конструкции при напряжении в арматуре, равном примерно 30 МПа, появляются трещины. При эксплуатации напряжения в растянутой арматуре достигают 200...300 МПа, при этом ширина раскрытия трещин достигает 0.2...0.4 мм. Такие трещины в нормальных температурно-влажностных условиях не приводят к опасной для конструкции коррозии арматуры. При использовании высокопрочной арматуры напряжения в ней достигают 400...800 МПа, ширина раскрытия трещин при этом достигает 0.5...3 мм, и арматура не будет защищена от коррозии. Кроме того, могут развиваться значительные прогибы конструкции.

Для борьбы с этими явлениями используется предварительное напряжение высокопрочной арматуры. Сущность предварительно напряженного железобетона заключается в том, что в конструкциях предварительно (в процессе изготовления) создается напряженное состояние, при котором в бетоне, растянутом при эксплуатации, появляются сжимающие напряжения.

На рис. 1.2, а, б показана схема изготовления предварительно напряженной железобетонной конструкции. Арматурный стержень из высокопрочной стали 1 закрепляется в упоре 2, натягивается домкратом и закрепляется на упоре 3. После заполнения бетоном опалубки 4 и твердения бетона концы стержня обрезают, и он обжи-



мает нижнюю зону бетона. При загрузке конструкции (рис. 1.2, в) в нижней зоне возникают растягивающие напряжения, которые суммируются со сжимающими напряжениями от предварительного обжатия.



**Рис. 1.2. Предварительно напряженная балка:**

*а* – изготовление балки, *б* – после отпуска напряженной арматуры с упоров на бетон, *в* – в нижней зоне напряжения в бетоне равны нулю, *г* – в нижней зоне образуются трещины

При нагрузке  $F_0$  напряжение в нижних волокнах балки становятся равными нулю. После приложения дополнительной нагрузки  $F_{crc}$  в нижней зоне появляются трещины (рис. 1.2, г). Таким образом, трещиностойкость предварительно напряженной балки повышается. Уменьшаются по сравнению с обычными (ненапряженными) балками прогибы от одинаковых нагрузок.

Предварительное напряжение железобетонных конструкций позволяет:

- применить высокопрочные арматурные стали и бетоны и тем самым облегчить конструкции и удешевить их;
- повысить трещиностойкость и жесткость конструкций.

### 3. Краткий исторический очерк развития железобетона

Бетон, как строительный материал, был известен в древности. Римляне оставили миру очень важное изобретение – бетон. Они использовали его, например, для водовода, проложенного по самому большому из построенных ими мостов длиной 275 м и высотой 49 м, перекинутому через реку Гардон у города Ним свыше 2000 лет назад. В Риме бетон применялся для строительства стен, дорог, виадуков и других сооружений. Бетон, изготовлялся из вулканического

песка, взятого со склонов горы Везувий. Знаменитая Аппиева дорога, купол Пантеона, пролетом свыше сорока метров, построены с применением бетона. Бетон использовался и при строительстве Великой китайской стены. В средние века секреты древних строителей были забыты.

В 1797 г. Д. Паркер из глины и извести получил романцемент (римский цемент). Джозеф Аспдин получил патент 21 октября 1824 г. на изобретение портландцемента. В это же время в России похожий цемент был изобретен Е.Г. Челиевым. Бетон начинает использоваться в строительстве для изготовления массивных конструкций.

В 1999 г. Франция и мировое сообщество отметили 150-летие изобретения железобетона. На роль родины железобетона претендовали Англия и США, но родиной железобетона по праву считается Франция. Основанием послужил вошедший во многие учебники по строительству эпизод: в 1849 году Жозеф Монье изготовил кадку для садовых растений, обмазав каркас цементным раствором. Именно сочетание таких двух материалов стало называться железобетоном.

Если же подходить строже к истории, то оказывается, что еще в 1848 году французский адвокат по профессии Жан Луи Ламбо первым соединил цементный раствор и арматурную сетку, построив лодку из железобетона. Показанная в 1855 году на Парижской выставке лодка Ламбо произвела настоящую сенсацию. Ламбо запатентовал судно из железобетона. Всего было построено три лодки по его проекту. Одно такое плавсредство функционировало практически полвека, а два других были подняты со дна озера на юге Франции к столетию указанной выставки.

В последующие годы Монье получил следующие патенты: в 1877 г. – на железобетонные железнодорожные шпалы, в 1880–83 гг. – на железобетонные перекрытия, здания, балки, своды и мосты, в 1885 г. – на железобетонные водопроводные и газовые трубы, в 1886 г. – на «новую систему возведения железобетонных стационарных и переносных домов, гигиеничных и экономичных». Первыми крупными объектами, возведенными по системе Монье, были резервуары для хранения воды емкостью до 250 куб.м. Первый железобетонный мост пролетом 16 м и шириной проезжей части 4 м был построен в 1875 г. В 1877 г. Монье получил патенты и на железобетонные колонны и балки. В 1886 г немецкий инженер *Gustav Adolf Wayss* (1851–1917) купил патент Монье и усовершенствовал принцип железобетона. Его исследования и создание строительной

фирмы *Wayss & Freytag* привели к распространению идеи Монье по всему миру.

В начале 1850-х гг. целые кварталы Парижа застраивались в невероятно короткий срок благодаря использованию известкового бетона Куанье. В 1861 г. он издал брошюру «Применение железобетона в строительном искусстве», где впервые указал на то, что бетон и стальные стержни в нем работают совместно.

Освоение железобетона шло одновременно во многих странах: Франции, Германии, Англии, США, России. Вайс и Баушингер (Германия) провели первые испытания железобетона, Геннебик (Франция) предложил здание, выполненное полностью из железобетона, Кенен предложил ставить арматуру в растянутую зону и разработал первые формулы для расчета железобетона.

Железобетон в России развивался самостоятельно, коммерческое руководство и капиталы часто были иностранными, а техническое руководство – русским. Профессор Н.А. Белелюбский в 1891 г. провел публичные испытания железобетонных конструкций в Петербурге. С 1898 г. разрешено применять железобетон при строительстве железных и шоссейных дорог. Из старых построек известны переходные мостики в московском ГУМе, запроектированные А.Ф. Лолейтом в 1892 г., маяк в Николаеве, построенный в 1904 г. К началу века относятся построенные из железобетона в Томске спичечная фабрика, элеватор, мост через р. Ушайку и др.

Первым крупным сооружением, выполненным из бетона и железобетона в Советском Союзе, была Волховская ГЭС на р. Волхов в Ленинградской области. Строительство началось в 1918 г. и закончилось в 1926 г. (автор проекта и руководитель строительства русский инженер Генрих Осипович Графтио).

К 1930-м гг. железобетон получил широкое применение во всем мире. К этому времени появились предварительно напряженные железобетонные конструкции (Э. Фрейсине), тонкостенные конструкции типа оболочек, отработана технология приготовления бетонной смеси, дозировка, транспортирование, зимнее бетонирование. Большой вклад в развитие расчета железобетона внес Артур Фердинандович Лолейт, который в 1931–1933 гг. предложил расчет по стадии разрушения, вместо применяемого в то время метода расчета по допускаемым напряжениям. В 1939 г. этот метод был принят в СССР – примерно на 30 лет раньше, чем за рубежом.

XXI век – век бетона и железобетона. У бетона и железобетона имеются преимущества:

- минимальное изъятие природных ресурсов при их производстве и максимальное использование отходов других отраслей;
- более высокие по сравнению с другими материалами прочность и долговечность;
- сочетаемость с другими материалами;
- перерабатываемость для строительных или иных нужд;
- экономичность;
- высокие эстетические и архитектурные качества;
- экологическая безопасность при производстве и эксплуатации.

По разным источникам, в мире его производится 2,7–3 млрд куб. м в год. В Японии, например, производится более 2 куб. м бетона на человека, в США – 1,3 куб. м, в Германии – 1,1 куб. м, Италии – 1,1 куб. м, в Израиле – 2 куб. м, а в России всего – 0,4 куб. м.

Никаких других стройматериалов в таком большом объеме не производится. По уровню технических и экономических показателей бетон и железобетон по-прежнему остаются основными конструктивными материалами.

#### **4. Области применения железобетона и перспективы его развития**

Железобетон находит широкое применение во всех областях современного строительства, что объясняется его долговечностью, возможностью использования местных строительных материалов, малым расходом стали, богатством и разнообразием форм. В строительстве используется монолитный, сборный и сборно-монолитный железобетон.

Конструкции из монолитного железобетона изготавливаются на стройке в проектное положение. Из него возводят сооружения, трудно поддающиеся членению и конструкции с малой повторяемостью. Сооружениям из монолитного железобетона можно придать любую форму, они обладают достаточной прочностью и жесткостью и более экономичны по расходу металла. Недостатки: сезонность работ, большая трудоемкость (частично устраняется при использовании сменной опалубки, сварной арматуры, бетононасосов, добавок).

Сборные железобетонные конструкции изготавливают на заводах, доставляя на строительные площадки автомобильным или железнодорожным транспортом и монтируя их с использованием подъемных

кранов. Такие конструкции могут изготавливаться и на строительных площадках на нулевой отметке.

Значительно меньшее распространение в нашей стране получили сборно-монолитные конструкции.

Железобетон используется в промышленном, гражданском и агропромышленном строительстве, на железнодорожном транспорте, при строительстве автомобильных дорог, мостов, сооружений водного транспорта, в оборонительных сооружениях долговременного характера, метрополитенах и во многом другом.

Широкое применение железобетона в строительстве обусловлено рядом других его достоинств: он негорюч, мало подвергается коррозии, невероятно прочен. Кроме того, железобетон – один из самых экологически чистых стройматериалов, потому что все его компоненты природного происхождения – крупный и мелкий заполнители, цемент, известь, металл и т.д. Использование железобетона позволило решить проблему массовой застройки жилых районов. Великий французский архитектор Ле Корбюзье однажды сказал: **«Современность принесла нам железобетон. Это необычайная удача. Мы получили возможность полностью удовлетворить как требования эстетики, так и требования экономики».**

Самый большой прогресс железобетон обеспечил в массовом городском строительстве – в массовом, поскольку долгое время считался непригодным для возведения эксклюзивных зданий. Достаточно сказать, что в абсолютном большинстве американских небоскребов, построенных до 1980-х гг., железобетон – материал вспомогательный, тогда как несущий каркас в них выполнен из стальных балок (кстати, как и во всех московских «сталинских» высотках). К чему это привело, стало ясно 11 сентября 2001 г, когда весь мир мог видеть стремительное обрушение в результате теракта башен-близнецов Всемирного торгового центра в Нью-Йорке. Проведенное затем расследование показало, что если бы каркас ВТЦ был не стальным, а железобетонным, то здания вероятнее всего устояли бы. Архитекторы учли уроки этой трагедии, и сейчас мировое «небоскребостроение» ориентировано на использование железобетона в качестве материала для несущих конструкций.

Примерами выдающихся сооружений из железобетона являются:

- два небоскреба нефтяной компании «Петронис» в Куала-Лумпуре, Малайзия высотой 582 м (рис. 1.3);



**Рис. 1.3. Небоскребы «Петронис» в Куала-Лумпуре**

- московская телебашня высотой 537 м, которая проектировалась Н.В. Никитиным – выпускником Томского политехнического института;
- телебашня в Торонто высотой 555 м;
- тоннель под проливом Ла-Манш между Францией и Великобританией;
- небоскреб Бурдж Халифа в Дубаи высотой 828 м (рис. 1.4);
- платформа «Тролл» (Норвегия) для добычи нефти в море высотой 472 м (платформа установлена на глубине 300 м и рассчитана на воздействие ураганного шторма с максимальной высотой волны 31.5 м), на ее изготовление израсходовано 250 тыс. м<sup>3</sup> бетона класса В80, 100 тыс. т обычной и 11 тыс. т напряженной арматуры;
- в Сиэтле (США) построен монолитный ребристый купол пролетом 220 м;
- защитные оболочки АЭС и многое другое.

Железобетонные конструкции постоянно совершенствуются, облегчаются, снижается их стоимость. Это достигается за счет:

- повышения прочности бетона до 100 МПа, применения легких конструктивных бетонов;



**Рис. 1.4. Самый высокий в мире небоскреб Бурдж Халифа в Дубаи высотой 828 м**

- повышения прочности арматуры и использования предварительного напряжения арматуры;
- применения более эффективных, в смысле статической работы, конструкций (например, оболочек);
- улучшение технологии изготовления железобетона;
- использование современной аппаратуры для контроля качества железобетонных конструкций.

По влиянию на развитие мировой цивилизации изобретение железобетона смело можно поставить в один ряд с открытием электричества, появлением автомобиля или авиации. Железобетон постоянно совершенствуется и не собирается сдавать своих позиций. Тем более, что по праву считается одним из самых экономичных, надежных и долговечных материалов. Он сохранит свою лидирующую роль в строительстве и в XXI в.

По словам известного итальянского инженера и архитектора Пьера Луиджи Нерви: *«Бетон – наилучший из материалов, изобретенных человечеством. История его – героический эпос человеческой мысли и воли. Нам нужен был определенный материал – и мы*

*Учебник*

**Кумпяк Олег Григорьевич, Галяутдинов Заур Рашидович,  
Пахмурин Олег Равильевич, Самсонов Валерий Сергеевич**

**ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ И КАМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ**

Редактор: *В.П. Бурмакин*  
Верстка: *В.П. Бурмакин*  
Дизайн обложки: *Т.А. Негорозова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.  
Подписано к печати 25.09.2014. Формат 60x90/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Усл. п.л. 42,0. 500 экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)  
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511.  
Тел., факс: (499) 183-56-83. E-mail: [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru). Сайт: [www.iasv.ru](http://www.iasv.ru)